http://pmse.scu.edu.cn

外气辅压力对塑料双腔导管挤出成型的影响

纪海波[1], 邓小珍[1], 刘 强[1], 肖 兵[1], 任 重[2], 范 莉[1]

(1. 江西水利电力大学 精密驱动与装备江西省重点实验室 机械工程学院, 江西 南昌 330099;
2. 江西科技师范大学 先进电子材料与器件江西省重点实验室, 江西 南昌 330038)

摘要: 为探究外气辅压力对非均匀壁厚塑料双腔导管挤出成型的影响机制,文中建立了双腔导管黏弹挤出流动模型,采用有限元方法并结合 Phan-Thien-Tanner 本构方程进行数值模拟,系统分析了不同外气辅压力下熔体速度、压力、剪切速率及第一法向应力差等流场参数的分布。结果表明,当内气辅压力保持 3000 Pa 不变时,随着外气辅压力从 1000 Pa 增大至 5000 Pa,导管收缩率由 2.5% 增至 9.2%,导管外轮廓与内型腔椭圆度呈现先减小后增大的趋势,在 4000 Pa 时达到最小。外气辅压力升高显著增大了熔体的径向与轴向速度、压力及第一法向应力差,其中气熔界面处的第一法向应力差是引起熔体收缩变形与流场重构的关键因素。气体辅助挤出试验验证了模拟结果的可靠性,并表明,外气辅压力过低(<1000 Pa)时难以形成稳定气垫层,压力过高(>5000 Pa)则会导致收缩过度与椭圆度增大,甚至引起熔体破裂,故合理调控外气辅压力(尤其在 3000~4000 Pa 区间)对优化双腔导管尺寸精度与形貌稳定性具有重要作用。

关键词: 外气辅压力;双腔导管;收缩率;气辅挤出;第一法向应力差

中图分类号: TQ320.66$^+$3 **文献识别码:** A **文章编号:** 1000-7555(2026)05-0103-09

随着塑料挤出成型技术的发展,塑料导管在医疗诊断、介入治疗、通讯及汽车工业等诸多领域得到广泛应用[1],尤其是介入医学,塑料多腔导管的需求持续增加。然而,传统挤出成型时,由于熔体本身固有的高黏弹性,其在流道中的流动情况非常复杂,离模后易产生胀大变形、熔体胀破等问题[2~4]。针对这些问题,气体辅助挤出成型技术提供了一种有效的解决方案[5,6],可有效改善流道中熔体的流动状态,显著提升制品质量。

目前,诸多学者对气体辅助挤出成型技术展开了广泛研究,旨在探究气体辅助挤出成型影响因素及其机理。陈思维[7]对医用级 TPU 导管气辅微挤出进行了研究,理论结果表明,通过引入气垫膜层,熔体与模具壁面间的黏附滑移转变为完全滑移,显著降低了机头内的熔体压力降,从而减少了挤出能耗;试验结果表明,气体压力升高会压缩气垫层厚度,导致挤出物直径减小,但压力过高会导致挤出物表面质量下降,出现竹节状变形,且直径偏差增大。Liu[8]和 Zhang 等[9]研究了气体压力和内外气体层压力差对气辅挤出微管的影响,研究表明,导管的收缩率随外气垫层压力的增大而增大,管壁偏移程度也随之增大,并且发现,先将气体压力调高至一定水平,再缓慢降低气体压力有助于形成稳定气体层,且能精确控制微管直径。刘斌[10]通过有限元数值模拟研究了不同气垫层压力差对抗菌导管外形尺寸的影响,研究发现,当内气体层压力比外气体层压力略大时,有助于减小导管变形问题。Liu 等[11~13]研究了双层气流对塑料微管气辅挤出的影响,结果表明,内外双层气体对口模出口处的微管具有较大的挤压作用,在口模出口处产生的径向流速会造成微管壁面

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0091
收稿日期: 2025-06-28
基金项目: 江西省重点研发计划项目(20243BBI91011); 国家自然科学基金资助项目(62165006)
通讯联系人: 邓小珍, 主要从事高分子材料加工成型研究, E-mail: Pear1617@163.com;
任重, 主要从事高分子材料加工成型研究, E-mail: renzhong0921@163.com

出现不规则波纹,甚至会造成熔体断裂。任重等[14,15]深入研究了气体压力在单腔导管气辅挤出成型过程中所产生的影响,结果表明,气体压力维持在相对较低水平且能够形成稳定气垫膜时,熔体流场的分布呈现出更为均匀的状态,压力及法向应力差均相对较小,此时挤出制品的形貌能够保持良好。

综上所述,当前有关气体压力对塑料导管气辅挤出成型影响的研究大多集中于壁厚均匀的单腔导管,对非均匀壁厚的多腔导管影响研究鲜见公开报道。本文以塑料双腔导管为研究对象,将气体单独设为一层,通过分析导管形貌变化和口模内外熔体速度、剪切速率、第一法向应力差等流场分布,探究外气辅压力对塑料双腔导管挤出成型的影响,研究结果可为实际生产提供理论依据。

1 模型和数值方法

1.1 几何模型及网格划分

Fig.1(a, b)为研究用导管几何结构及尺寸,采用内外双层气垫层气体辅助,其中塑料双腔导管外轮廓直径为 2 mm,两型腔直径均为 0.5 mm,内外气垫层厚度均设为 0.1 mm,流动模型分为口模段(10 mm)和自由胀大段(10 mm)。Fig.2 为导管网格模型,采用六面体网格进行划分,在场量变化较大的口模出口附近,网格适当加密,以提高计算精度。同时,由于双腔导管的对称结构,为节约计算时间和资源,取导管模型的 1/4 进行计算。

1.2 控制方程与本构方程

根据塑料熔体在挤出口模中的实际流动状况,可将熔体简化为不可压缩非牛顿黏弹流体,忽略成型过程中的重力、惯性力和表面张力的影响,控制方程简化为式(1)和(2)。

连续方程:

$$\nabla \cdot v = 0 \tag{1}$$

动量方程:

$$\rho v \cdot \nabla v = -\nabla p + \nabla \tau \tag{2}$$

式中:∇——哈密顿算子;v——速度矢量,m/s;ρ——熔体密度,kg/m^3;p——熔体静压力,Pa;τ——偏应力张量,Pa。

选用 Phan-Thien-Tanner(PTT)微分黏弹本构方程描述熔体在流道中的流动行为和流道外的挤出胀大行为[16],表达式如式(3)所示

$$\begin{cases} \exp\left[\dfrac{\varepsilon\lambda}{(1-\eta_r)\eta_0} tr(\tau_1)\right]\tau_1 + \lambda\left[\left(1-\dfrac{\xi}{2}\right)\overset{\nabla}{\tau}_1 + \dfrac{\xi}{2}\overset{\Delta}{\tau}_1\right] \\ = 2(1-\eta_r)\eta_0 D \\ \eta_r = \eta_1/\eta_0 \end{cases} \tag{3}$$

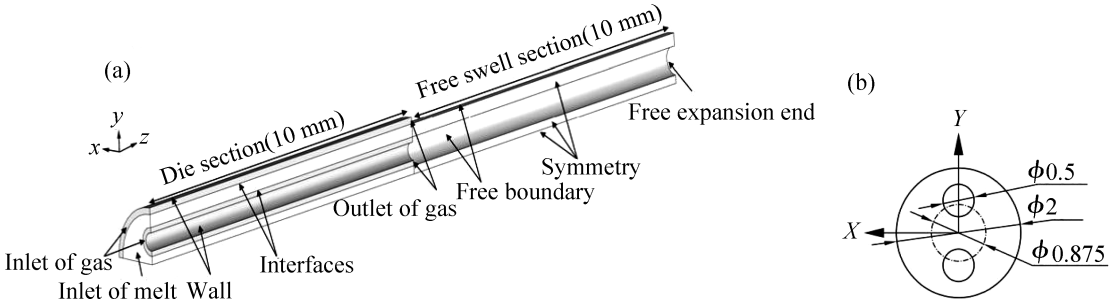


Fig. 1 (a) Catheter geometry and (b) cross-sectional dimensions

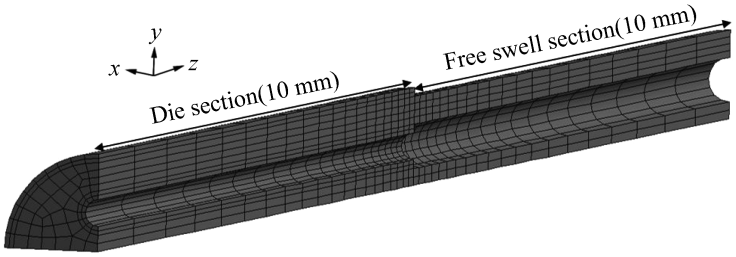


Fig. 2 Finite element meshes of the catheter

式中:ε——与熔体拉伸特性有关的材料参数;λ——松弛时间,s;η_0——总黏度,Pa·s;η_r——黏度比,其中 η_1 为 η_0 的黏性分量;τ_1——偏应力张量,Pa;ξ——与熔体剪切黏度有关的参数;$\overset{\nabla}{\tau}_1$ 和 $\overset{\Delta}{\tau}_1$——分别为 τ_1 的上、下随体导数;D——熔体形变速率张量。

1.3　边界条件

(1)入口边界:熔体在入口处的流动为充分发展流,即满足 $\frac{\partial v_z}{\partial z}=0$,$v_x=v_y=0$,$z$ 方向为熔体流动方向;气体为不可压缩完全发展流,采用压力入口边界条件。

(2)壁面:满足 $v_n=v_s=0$,v_n 和 v_s 分别为法向速度和切向速度。

(3)流体层间界面:满足动力学条件 $f_{s(\mathrm{I})}=f_{s(\mathrm{II})}$ 和运动学条件 $v_{s(\mathrm{I})}=v_{s(\mathrm{II})}$,$v_n=0$,其中 I 和 II 分别表示气体和熔体,$f_s$ 表示切向应力。

(4)对称面:满足 $f_s=0$,$v_n=0$。

(5)自由胀大表面:满足 $f_n=0$,$f_s=0$,$v_n=0$,f_n 表示法向应力。

(6)气体出口:设为 Outflow 出口边界条件。

(7)自由胀大末端:满足 $f_n=0$,$f_s=0$。

1.4　材料物性参数及工艺条件

材料物性参数如 Tab.1 所示[17]。口模内气体和熔体温度均设置为 200 ℃,内气辅压力设置为 3000 Pa,设置 5 种不同的外气辅压力,分别为 1000 Pa,2000 Pa,3000 Pa,4000 Pa 和 5000 Pa,熔体入口流率设为 10 mm^3/s。

Tab. 1　Material property parameters

	η_0/(Pa·s)	λ/s	ε	ξ	η_r
Melt	8823	0.1	0.15	0.44	0.12
Gas	2.6×10^{-5}	0	0	0	0

2　模拟结果与讨论

2.1　导管挤出成型形貌分析

为探究外气辅气体压力对双腔导管挤出成型的差异化影响,引入参数 B_0 表征导管收缩率,计算公式如式(4)所示

$$B_0=\frac{S_A-S_D}{S_A} \tag{4}$$

式中:S_A——口模出口截面面积,mm^2;S_D——双腔导管末端截面面积,mm^2。

Fig.3 为外气辅压力对双腔导管收缩率的影响。由图可知,外气辅压力越大,导管截面积越小,即导管收缩率越大,且导管收缩率与气体压力呈近似正比关系,当外气辅压力从 1000 Pa 增至 5000 Pa 时,导管收缩率从 2.5% 增至 9.2%。

Fig.4 为外气辅压力对双腔导管椭圆度的影响。由图可知,随着外气辅压力增大,导管外轮廓和型腔椭圆度先减小后增大,当外气辅压力从 1000 Pa 增至 4000 Pa 时,外轮廓和型腔椭圆度降低到最小值,当外气辅压力继续增大至 5000 Pa 时,外轮廓和型腔椭圆度均呈现增长趋势。

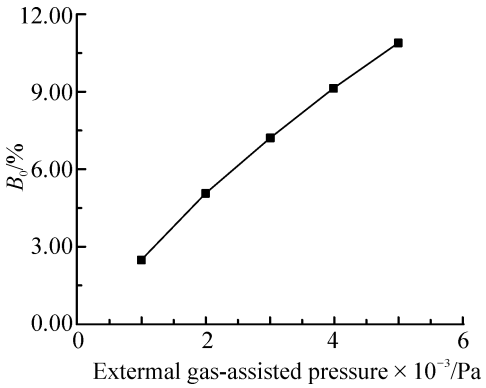


Fig. 3　Effect of external gas-assisted pressure on shrinkage rate of catheter (B_0)

2.2　速度场分析

由于塑料双腔导管壁厚不一致,为观察导管不同位置的流场变化情况,选择如 Fig.5 所示的位置进行分析,其中 A 点和 B 点分别为导管外轮廓表面,C 点为导管型腔内表面。

Fig.6 为不同外气辅压力下,导管外轮廓表面(A 点或 B 点)及型腔内表面(C 点)沿挤出方向的径向

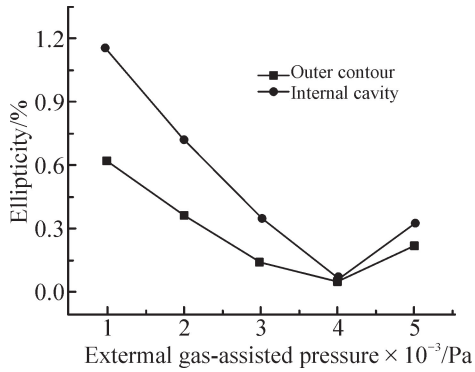


Fig. 4 Effect of external gas-assisted pressure on ellipticity

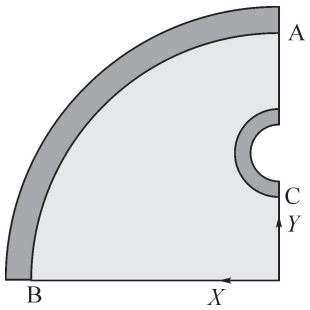


Fig. 5 Catheter section location

速度分布图。由 Fig.6(a, b)可知,导管外轮廓表面(A 点)和型腔内表面(C 点)在口模入口附近均产生了指向圆心的 y 向速度,y 向速度为负值且垂直于熔体挤出方向,即熔体向圆心流动,但相同气体压力时,A 点速度值大于 C 点速度值,故导管 y 向总体呈收缩趋势;由 Fig.6(c)可知,导管外轮廓表面(B 点)在口模入口附近产生了指向圆心的 x 向速度,x 向速度为负值且垂直于熔体挤出方向,使得熔体在 x 方向呈现收缩趋势。此外,随着外气辅压力增大,x 向和 y 向速度值均增大,导管向内收缩越明显,即收缩率随着外气辅压力的增大而增大。导管收缩的主要是气体压力足够大时,气/熔界面会形成反向挤压作用,促使熔体向口模中心区域发生迁移,这种径向流动导致导管横截面积收缩,最终表现为挤出制品的尺寸收缩。

Fig.7 为不同外气辅压力时导管外表面(A 点)熔体沿挤出方向的 z 向速度分布。由图可知,导管表面熔体轴向速度在口模内逐渐增大至口模出口附近保持恒值,这是由于气体速度大于熔体速度,气体对界面熔体具有一定拖曳作用,使得界面熔体在口

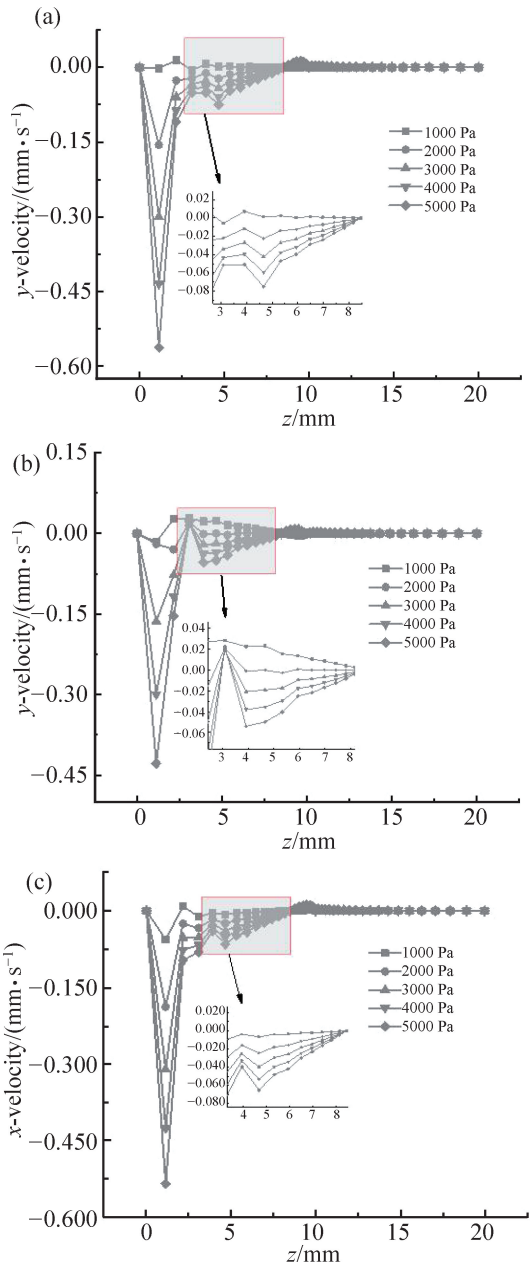


Fig. 6 Radial velocity distribution along the extrusion direction: (a) *y*-velocity distribution at the point A; (b) *y*-velocity distribution at the point C; (c) *x*-velocity distribution at the point B

模内会有一段速度增大的过程。当熔体入口流速保持不变,出口流速逐渐增大时,熔体向轴向拉伸变薄,即熔体径向截面形状重构,导致导管径向收缩。由于气体压力的作用,导管沿径向收缩,即导管收缩率随气体压力增大而增大。此外,导管表面熔体 z 向速度随外气辅压力的升高而增大,可见外气辅压

力越大,导管挤出速度越快,气体对熔体的拖曳作用越明显,故适当提高辅助气体压力有利于提高双腔导管挤出产量。

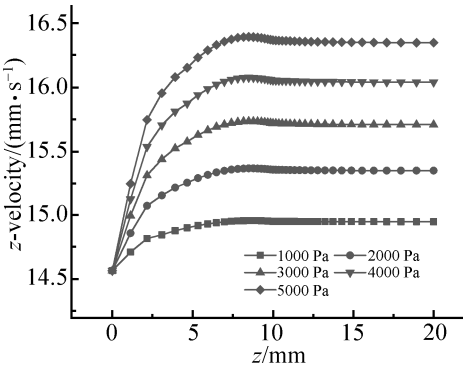


Fig. 7　*z*-Velocity distribution at the point A along the extrusion direction

2.3　压力场分析

Fig.8 为不同外气辅压力条件下,导管外轮廓表面(A 点)熔体沿挤出方向的压力分布。由图可知,熔体表面压力随外气辅压力的增大而增大,这是由于气体压力越大,对熔体的挤压作用越强,而沿熔体挤出方向,压力降逐渐衰减,在口模出口处接近零值,且趋于平衡。

2.4　剪切速率分析

Fig.9(a)和(b)分别为不同外气辅压力条件下,导管外轮廓表面(A 点)和型腔内表面(C 点)沿挤出方向的剪切速率分布。从图中可以看出,在气体与熔体的交界面,无论是外轮廓表面还是型腔表面,口模入口处均产生了较大的剪切速率,且沿挤出方向逐渐减小,在口模出口处降为零值。随着导管外气辅压力的增大,导管外轮廓剪切速率增大,型腔表面剪切速率减小,可见外气辅压力对熔体的剪切作用比内气辅层更显著,主要是因为外气辅与模具壁面之间的接触面积比内气辅与芯棒之间的接触面积更大,且内气辅压力不变,外气辅压力逐渐增大时,气体对熔体的挤压作用更强。

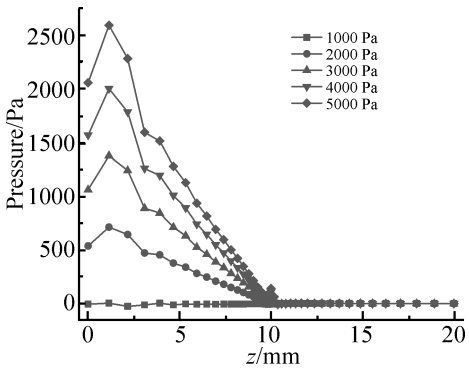


Fig. 8　Pressure distribution at the point A along the extrusion direction

2.5　第一法向应力差分析

Fig.10(a)和(b)分别为不同外气辅压力下导管外轮廓表面(A 点)和型腔内表面(C 点)沿挤出方向上的第一法向应力差(N_1)分布。由图可知,在口模入口附近,熔体内外表面均存在较大的 N_1,这是口模内熔体速度和压力分布重排的重要因素。随着外气辅压力增大,N_1 极值呈增长趋势,但沿熔体挤出方向快速减小,在口模出口处接近零值,表明气体压力主要影响入口区域的应力分布,该应力梯度会引发熔体产生径向速度场和压力梯度,从而致使导管截面变形。

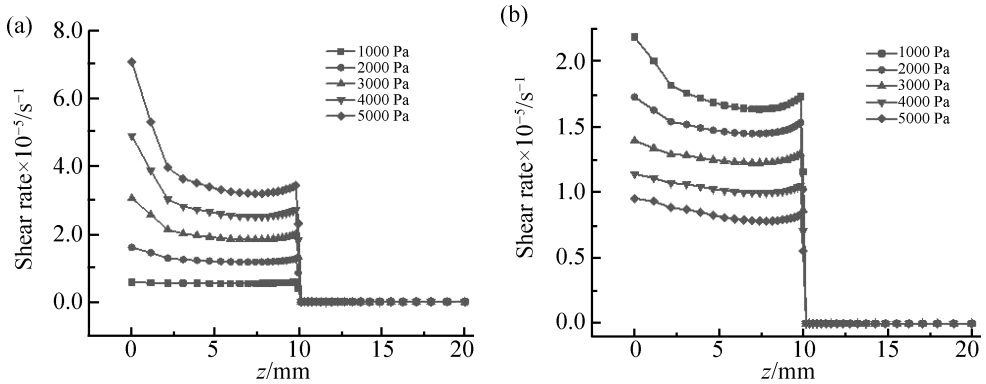


Fig. 9　Shear rate distribution along the extrusion direction: (a) shear rate distribution at the point A; (b) shear rate distribution at the point C

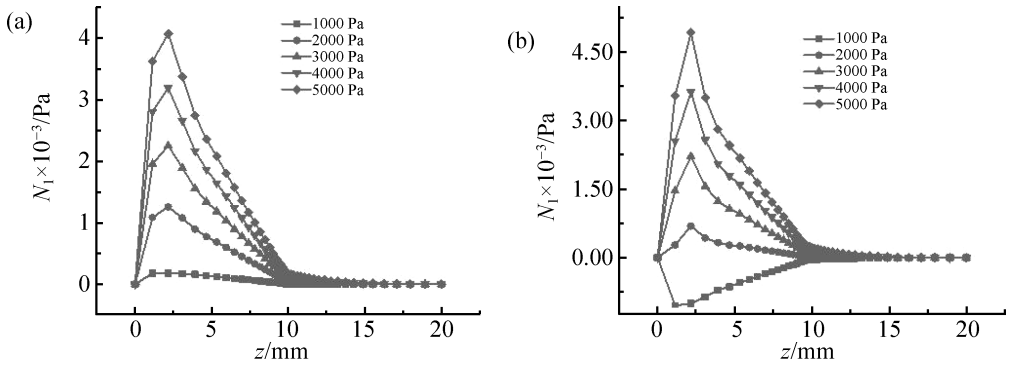


Fig. 10 N_1 distribution along the extrusion direction: (a) N_1 distribution at the point A; (b) N_1 distribution at the point C

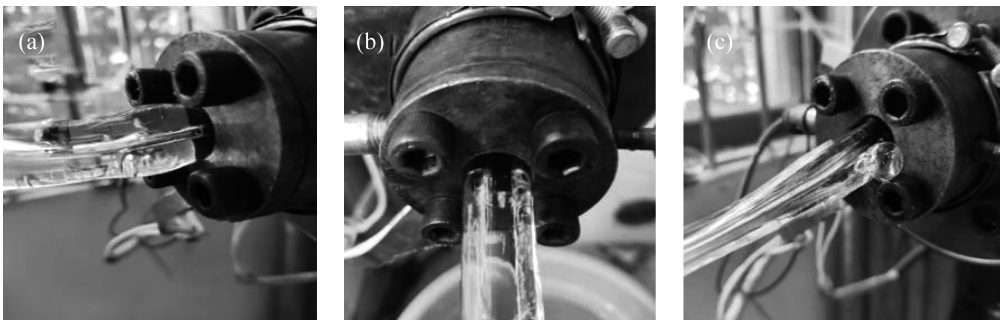


Fig. 11 Extrusion experiment of the double-lumen catheter: (a) 0 Pa; (b) 3000 Pa; (c) 10000 Pa

3 气体辅助挤出试验验证

为验证数值模拟结果的可靠性,进行了双层气体辅助挤出试验。试验和模拟原料均为中国石化集团茂名石油化工有限公司生产的聚丙烯(PP,牌号PPH-T03),其熔融指数为 3.5 g/10 min,单螺杆挤出机直径 Φ25 mm,长径比 25∶1,变频电机驱动,电机额定频率 50 Hz,额定转速 1420 r/min,螺杆传动比 20.9∶1,电机与皮带轮传动比为 10∶1。气体辅助装置由上海佳力士机械有限公司生产的单螺杆风冷系列空压机,连接高压储气罐、转子流量计、压力控制器及输气管路等组件构成。

Fig.11(a)为气体压力为 0 Pa,即传统无气辅挤出工况下,挤出过程出现了明显的挤出胀大现象。Fig.11(b)为双侧气体压力均为 3000 Pa 时,形成双层稳定气垫层时的挤出效果,可以看出无明显挤出胀大。Fig.11(c)为双侧气体压力均为 10000 Pa 时的挤出效果,可以看出此时熔体被气体吹破,产生了严重的破裂缺陷。上述试验现象表明,气辅压力对双腔导管挤出成型形貌具有重要影响,在实际的气体辅助挤出成型过程中,气体压力的调控需严格把控。若压力过低,难以形成稳定的气垫层,无法充分发挥气辅挤出的优势;而压力过大同样存在风险,一旦超过熔体承受压力的最大临界值,不仅会致使熔体发生变形,甚至可能出现熔体被气体直接吹破的情况,严重影响成型质量与产品性能。

为探究不同外气辅压力对塑料双腔导管挤出成型的作用规律,螺杆转速固定为 8.5 r/min,熔体温度控制在 200 ℃,内气辅压力(P_{in})设置为 3000 Pa,外气辅压力(P_{out})分别设置为 1000 Pa,2000 Pa,3000 Pa,4000 Pa 和 5000 Pa。Fig.12 为不同气体压力时塑料双腔导管试验样品截面。

经过对上述实验样品测量计算,得到 Fig.13,对比 Fig.3 和 Fig.4 可知,试验与模拟结果整体趋势一致,验证了数值模型的可靠性。误差产生的主要原因是,试验过程中流体流率、温度等工艺因素的综合影响,且双腔导管壁厚的不均匀性,样品冷却过程中各点应力不均,使得导管外形和椭圆度与理论研究存在差异。

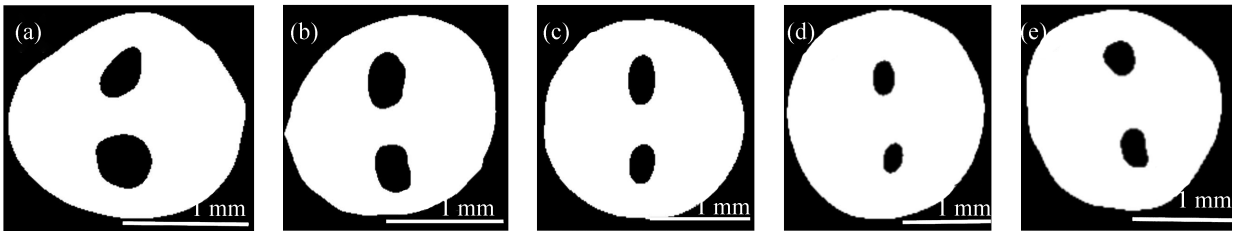


Fig. 12　Sectional morphology of the test samples: (a) 1000 Pa; (b) 2000 Pa; (c) 3000 Pa; (d) 4000 Pa; (e) 5000 Pa

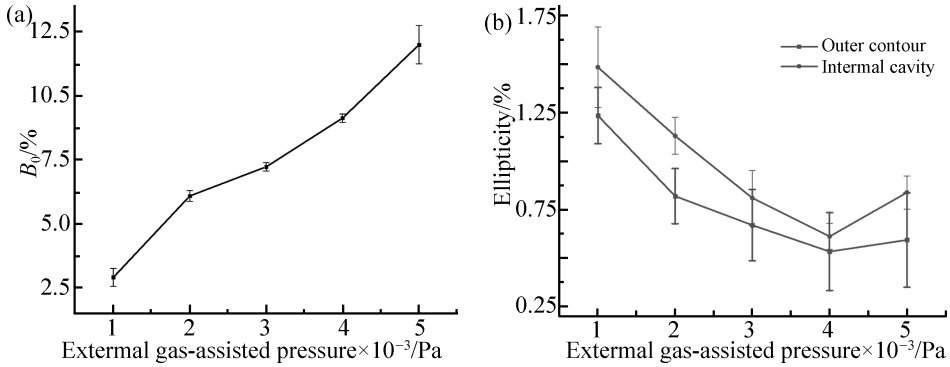


Fig. 13　Gas-assisted extrusion test of the plastic double-lumen catheter: (a) effect of the external gas-assisted pressure on the shrinkage rate of catheter (B_0); (b) effect of the external gas-assisted pressure on the ellipticity

4　结论

(1)外气辅压力与导管收缩率呈近似正比关系,当内气辅压力固定为 3000 Pa 时,外气辅压力从 1000 Pa 增至 5000 Pa,导管收缩率从 2.5% 增至 9.2%;而导管外轮廓和内型腔椭圆度呈先减后增的变化规律,在 4000 Pa 时达到最小值,继续增至 5000 Pa 时椭圆度均呈增长趋势,表明外气辅压力通过调控熔体径向挤压程度,直接影响导管尺寸收缩与截面形状规整性。

(2)外气辅压力对熔体流场参数影响显著,随压力升高,熔体的径向速度、轴向速度、压力及第一法向应力差均显著增大,口模入口附近熔体内外表面的第一法向应力差尤为突出,其引发的速度场与压力梯度重构是熔体收缩变形的核心原因;同时外气辅压力对熔体的剪切作用强于内气辅层,导致导管外轮廓表面剪切速率增大,型腔表面剪切速率减小,进一步加剧熔体收缩变形。

(3)气辅压力的合理调控是双腔导管成型质量的关键,试验验证显示,压力低于 1000 Pa 时难以形成稳定气垫层,无法抑制传统挤出的胀大缺陷;压力在 3000~4000 Pa 区间时,可兼顾低椭圆度与可控收缩率,成型效果最优;压力超过 10000 Pa 时会导致熔体破裂,而 5000 Pa 时已出现收缩过度、椭圆度增大的问题,因此,实际生产中需将外气辅压力控制在适宜区间,以平衡尺寸精度与形貌稳定性。

参考文献:

[1] 邓小珍, 陈天荣, 刘彪, 等. 多腔微管气体辅助挤出成型的影响机制[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(11): 79-86.
Deng X Z, Chen T R, Liu B, *et al*. Influence mechanism of gas-assisted extrusion molding for multi-lumen microtube[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(11): 79-86.

[2] Mitsoulis E, Georgiou G C, Kountouriotis Z. A study of various factors affecting Newtonian extrudate swell[J]. Computers & Fluids, 2012, 57: 195-207.

[3] Rabhi F, Larochelambert T D, Barriere T, *et al*. Experimentation, identification, and simulation of polymer swelling at extrusion die outlets[J]. Polymer Engineering and Science, 2024, 64: 3817-3833.

[4] 王禹, 张亚军, 郑永彪, 等. 聚合物气辅挤出技术研究进展及应用[J]. 中国塑料, 2025, 39(3): 114-117.
Wang Y, Zhang Y J, Zheng Y B, *et al*. Research progress of polymer gas-assisted extrusion technology and its applications[J]. China Plastics, 2025, 39(3): 114-117.

[5] Zhang X H, Huang X Y, Chen S Q. Three-dimensional numerical simulations and experimental studies on the viscoelastic rheological and deformation behavior of polymer catheter in gas-assisted

extrusion processing[J]. Physics of Fluids, 2024, 36: 3111.

[6] Deng X Z, Ji H B, Liu B, *et al*. Influence of the flow rate on the die swell for polymer micro coextrusion process[J]. e-Polymers, 2025, 25: 20240107.

[7] 陈思维. 医用级 TPU 的气辅微挤出成型过程研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.
Chen S W. Research on medical grade TPU gas-assisted micro extrusion process[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017.

[8] Liu B, Huang X Y, Ren S Y, *et al*. Effect of pressure difference between inner and outer gas layer on micro-tube deformation during gas-assisted extrusion[J]. Polymers, 2022, 14: 3559.

[9] Zhang X H, Huang X Y, Liu B, *et al*. Study on the melt rheological characterization of micro-tube gas-assisted extrusion based on the cross-scale viscoelastic model[J]. Polymers, 2024, 16: 973.

[10] 刘斌. 抗菌导管的气辅挤出制备和性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
Liu B. Preparation and properties study of antibacterial catheter by gas-assisted extrusion[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.

[11] Liu T K, Huang X Y, Luo C, *et al*. The formation mechanism of the double gas layer in gas-assisted extrusion and its influence on plastic micro-tube formation[J]. Polymers, 2020, 12: 355.

[12] Liu T K, Huang X Y, Ren Z, *et al*. Analysis of superimposed influence of double layer gas flow on gas-assisted extrusion of plastic micro-tube[J]. International Polymer Processing, 2020, 35: 158-168.

[13] 刘同科, 黄兴元, 柳和生, 等. 塑料微管气辅挤出中内气垫层气体的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 6(4): 75-86.
Liu T K, Huang X Y, Liu H S, *et al*. Influence of gas in the inner gas layer on gas-assisted extrusion of plastic micro-tube[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 6(4): 75-86.

[14] 任重, 黄兴元, 柳和生, 等. 气体压力对聚合物气辅挤出成型影响实验及模拟[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(1): 200-207.
Ren Z, Huang X Y, Liu H S, *et al*. Experiment and simulation on the effect of gas pressure on polymer gas assisted extrusion forming[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(1): 200-207.

[15] Ren Z, Deng X Z, Ji H B. Influences and failure analysis of the interaction between melt and gas on double-layer gas-assisted extrusion molding of polymer micro-catheters[J]. Polymers, 2025, 17: 504.

[16] Thien N P, Tanner R I. A new constitutive equation derived from network theory[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1977, 2: 353-365.

[17] Chen S Q, Huang X Y, Liu B, *et al*. Influence of gas inlet slit width on gas-assisted plastic micro-tube extrusion[J]. Processes, 2023, 11: 2025.

Influence of the External Gas-Assisted Pressure on the Plastic Double-Lumen Catheters Extrusion Process

Haibo Ji[1], Xiaozhen Deng[1], Qiang Liu[1], Bing Xiao[1], Zhong Ren[2], Li Fan[1]

(*1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Precision Drive and Equipment, School of Mechanical Engineering, Jiangxi University of Water Resources and Electric Power, Nanchang 330099, China;*

2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Advanced Electronic Materials and Devices, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330038, China)

ABSTRACT: To explore the influence mechanism of external gas-assisted pressure on the extrusion process of the plastic double-lumen catheters with a non-uniform wall thickness, the viscoelastic extrusion flow model was established. The numerical simulations were performed by the finite element method combined with the Phan-ThienTanner constitutive equation. The flow field distributions were systematically analyzed, including the melt velocity, pressure, shear rate, and first normal stress difference, at varying external gas-assisted pressures. The results indicate that when the internal gas-assisted pressure remains constant at 3000 Pa, the catheter shrinkage rate increases from 2.5% to 9.2% as the external gas-assisted pressure rises from 1000 Pa to 5000 Pa. Meanwhile, the ellipticity of the outer contour and the inner cavity exhibits a trend of decreasing firstly and then increasing, reaching its minimum at 4000 Pa. The increase in the external gas-assisted pressure significantly enhances the radial and axial velocities, pressure, and first normal stress difference of the melt. Notably, the first normal stress difference at the gas-melt interface plays a crucial role in causing the melt shrinkage deformation and flow field redistribution. The gas-assisted extrusion experiments validate the reliability of the simulation results and reveal that an excessively low external gas pressure (less than 1000 Pa) hinders the formation of stable gas-cushion layer, while an excessively high pressure (greater than 5000 Pa) leads to excessive shrinkage, increased ellipticity, and even melt rupture. Therefore, the reasonable regulation of the external gas-assisted pressure, particularly within the range of 3000 ~ 4000 Pa, plays a significant role in optimizing the dimensional accuracy and morphological stability of the double-lumen catheters.

Keywords: external gas-assisted pressure; double-lumen catheter; shrinkage rate; gas-assisted extrusion; first normal stress difference